

# 布生地 of 展開および折り畳み操作のための一対のエンドエフェクタ

## A Pair of End-Effectors for Unfold-to-Fold Fabric Manipulation

学 藤原 俊史 (信州大) ○学 吉岡 優太 (信州大) 正 山崎 公俊 (信州大)

Shunji FUJIHARA, Shinshu University  
Yuta YOSHIOKA, Shinshu University  
Kimitoshi YAMAZAKI, Shinshu University

This paper describes a pair of end-effectors for manipulation a fabric product based on pinch-and-slide unfolding. One end-effector is two-fingered and has a passive rotation mechanism. This mechanism prevents the fabric from falling off the fingers when spreading the fabric in a pinch-and-slide motion. We also devise the mechanism to keep the fingers parallel to handle various fabric thicknesses. In addition, the other end-effector and its motion method were proposed for smooth folding after unfolding. Experiments were conducted to investigate the effectiveness of the end-effectors, and it was confirmed that unfold-to-fold manipulation were possible with fabrics of different thicknesses and weights.

**Key Words:** Robot hand, Cloth manipulation, Unfolding.

### 1. 緒言

自動機械に布を操作させることは、挑戦的な課題である。例えば、テーブル上に無造作に置かれた布製品を所望の目標形状に畳もうとする作業を考える。これを人間がおこなうときの手順を観察すると、一般には、置かれた状態から直接的に目標形状を実現するのではなく、まず、その布製品を持ち上げて開いた状態にする、すなわち「展開」の作業が入ることがわかる。この展開作業には、初期の無秩序な形状から、いったん既知の形状へ遷移させる効果がある。これにより、以後は定型的な手順をこなすことで折り畳みなどを実現できるようになる。このことから、布製品の操作においては、布を一度展開してから折り畳んでいくことが有効な方策であることがわかる。

本研究の目的は、布生地 of 折り畳みを容易にする双腕用エンドエフェクタの提案である。展開動作については摘み滑り動作[1][2]を採用し、この動作の成功率を高められるようなロボットハンドの構造および動作方法を提案する。摘み滑り動作は、二つのエンドエフェクタがあることを前提とした展開方法である。まず片方のエンドエフェクタで布の角部等を掴み、もう一方のエンドエフェクタでその近くを掴む。その後、布生地から指が離れないように後者のエンドエフェクタをフチ上を滑らせるように動かす。これにより、二つのエンドエフェクタの間で布生地を展開される。その後は折り畳みに移行し、適切に折りたたむことを目指す。

これまでの研究でも、布生地を展開する方法が多く提案されている。一つの方法は、一方のエンドエフェクタで布製品を掴んでぶら下げ、カメラ等で布製品を計測し、そこから把持点を見つけ出し、そこをもう一方のエンドエフェクタで掴んで展開することである[3][4]。布は様々な形状を取りうることから、この方法では高度な状態推定を要し、それゆえに処理時間が多くかかるケースもある。一方で摘み滑り展開は、すでに一方のエンドエフェクタで把持されている場所付近を別のエンドエフェクタで把持すれば、そこから作業を開始できる。

ただし、摘み滑り展開にはいくつかの作業の失敗要因がある。その一つは布自身にかかる重力である。摘み滑りをしてい最中に布が下方に引っ張られ、指の隙間から落ちてしまう。そもそも摘み滑りでは、エンドエフェクタの把持力を布を滑らせる程度の大きさにするので、そこで重力により布が下方向に滑ることは致し方ないと考えられる。しかしながら、

この現象をなるべく避ける形で布操作ができれば、摘み滑り展開の有用性が高まると考えられる。

本研究の貢献は次のとおりである。

- 摘み滑り展開のためのロボットハンド[5]を改良し、既存機構の課題を解決する。それにより、厚みの異なる布生地においても摘み滑り展開を実現可能にした。
- 展開ののちに折りたたみをおこなう「Unfolding-to-Folding task」をスムーズにおこなうための動作方法およびエンドエフェクタを考案した。
- 提案エンドエフェクタを製作し、厚みや重さの異なる複数の布生地 with 展開および折り畳みの実験をおこない、その機能を確認した。

### 2. 課題とアプローチ

Unfold-to-Fold タスクは、矩形の布生地 of 角部を摘んで持ち上げた状態から始まる。つまり、布生地は角部を最上端として吊り下げられる。そして、つまみ滑りで用いられるであろう布のフチは、試行ごとに異なる形状となり得る。布生地を摘んでいるエンドエフェクタともう一つのエンドエフェクタを用いて次の手順で Unfold-to-Fold をおこなう。ここではそれぞれを左手・右手と表現する。右手が摘み滑り展開のためのエンドエフェクタであり Unfolding で主に用いる。左手は Folding で主に用いる。

1. (左手)準備として、矩形の布生地 of 角部を把持して持ち上げておく。
  2. (右手)左手の付近に移動し、フチの周辺に触れる。
  3. (右手)摘み滑り展開
  4. (左手)右手の端から突き出ているフチを掴む
  5. (左手・右手)布生地を二つ折りにする
2. はつまみ滑り展開のための最初のアクションであるが、ここでは滑り動作の対象となる布縁が布生地 of 中央を向くように大きく折れることがある。この状態で展開動作を始めると、うまく展開動作を行うことができない。このほかにも、つまみ滑り展開の最中にエンドエフェクタから布生地が抜け落ちるといった失敗が起きうる。これらに対処するため、右手のエンドエフェクタへの要求事項は主に以下の二点とする。

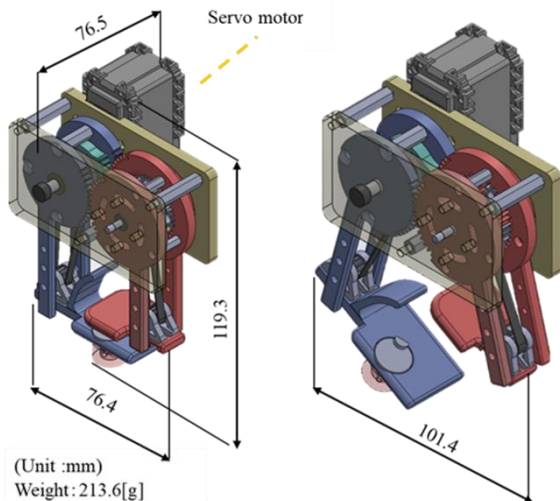


Fig. 1 The end-effector for pinch-and-slide unfolding (PS-hand)

- (a) 展開動作中に布生地を折れを解消できること
- (b) 布生地がエンドエフェクタから抜け落ちないこと  
また、Unfolding が達成されたのちは、そのまま布生地を二つ折りにする。このために、左手のエンドエフェクタへの要求事項として以下がある。
- (c) 既に掴んでいる角部を離さずに、もう一方の角部をつかむこと。

以上に対する本研究のアプローチは次のとおりである。(a)への対策として、エンドエフェクタと布生地を面接触で挟み込む方針を採る。そして、布生地を掴んだ時点で折れが解消されているように指形状、およびエンドエフェクタの動きを工夫する。一方で、(b)への対策として、布縁が指の間から抜け落ちないように、指腹にはフチの微小な出っ張りに引っかかるような突起を取り付ける。このとき、単純に突起を設けるだけではフチを捉え続けることは難しいので、突起に受動回転機構を付加する。この方針が一定程度適切に機能することは先行研究[5]によって確かめられている。一方で、左手用のエンドエフェクタについては、人間が同様の折り畳みをしているときの指先の働きを参考に、機構を考案する。このとき、少ないアクチュエータ数で複数の角部を把持させることを念頭に置き、小型かつ軽量の機構とすることを心掛ける。

### 3. つまみ滑り用エンドエフェクタ

つまみ滑り動作を主目的とするエンドエフェクタの外観は図1に示すとおりである。これは前章で右手とした側のハンドであり、本稿では以後、PS (Pinch-and-slide) hand と称する。PS hand は大きく分けて、挟み込み部、折れ解消部の2つによって構成されている。

挟み込み部は布生地のつまみ滑りにとって最も重要な部位である。先行研究では二指が平行となる指の腹部分に突起を設置することで、高い成功率でつまみ滑りを実現できた。しかし指の腹部分が平行となるのはエンドエフェクタを閉じきった場合のみであった。すなわち、布生地を挟み込むときの指間の距離はハードウェアによって固定されていた。そのためPS hand では、エンドエフェクタの開閉に合わせて、指腹部分を向かい合わせに揺動運動をさせる。揺動の回転角度が一致していれば、エンドエフェクタの開閉度合いによらず常に二指の腹部

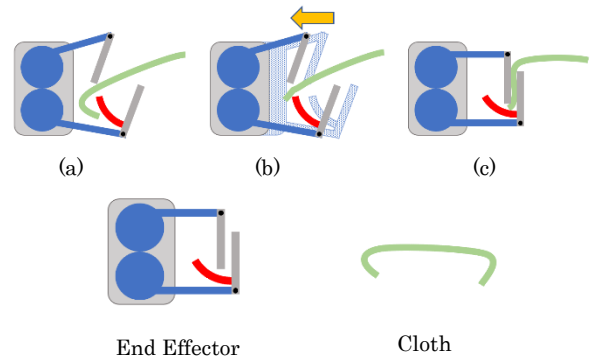


Fig. 2 Bending state cancellation

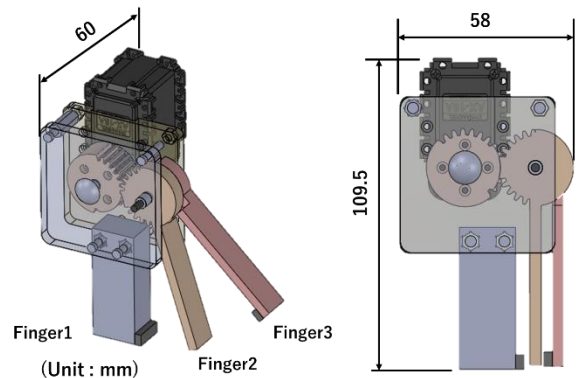


Fig. 3 The end-effector for Corners holding (CH-hand)

分は平行を保たれる。この揺動運動を実現するにあたっては、遊星歯車機構とベルト・プリー機構を組み合わせる。これにより、アクチュエータの増設せずに動作を可能にする。

上記の機構により、様々な厚みの布を面で保持することが可能となる。一方で、先行研究のハンドで実現できていた動きの一部が難しくなった。具体的には、最初に吊り下げた状態の布地から折れを解消する動作が難しくなった。なぜならば、先行ハンドでは指先を布の折れの中に差し入れて引っ掛ける動作ができていたのだが、PS ハンドで指先をかぎ状の形にして布の間に差し込むには、ロボットアームに大きな可動範囲が必要になってしまったためである。

この解決のため、外側の指の関節部に補助となる指をつけ、それを利用して折れの解消をおこなう。図2はその様子である。図中の(a)-(c)では以下の作業をしている。

- (a) 布生地の中央付近でエンドエフェクタの先端が接触する程度に指を閉じる。
- (b) その先端を布縁に接触させながらエンドエフェクタ全体を平行移動することで、布生地の折れを解消する。
- (c) 布生地が広がったところで指を閉じ、布生地を挟み込む

### 4. 折りたたみ用エンドエフェクタ

布生地が展開できたとし、その後に半分に折りたたむ動作を考える。人間がこれを行う場合、布を横方向に折りたたみ、現在左右の手それぞれで把持している角部を同じ位置に持っていき、その後、片方の手で二つの角部をそろえて把持する。このとき、布生地が落ちない程度に押さえながら指腹を布上で滑らせたり、押さええている指を入れ替えるなどのきわめて器用な持ち替えをおこなっている。



(a) Cloth1 (b) Cloth2 (c) Cloth3

Fig. 4 Rectangular fabric product used in the experiment.

Table 1 Experimental result

	Cloth 1	Cloth 2	Cloth 3
先行研究[5]	90%	100%	40%
PS hand	80%	80%	80%

本研究では、そのような器用な指の動きを再現するのではなく、角部の位置をそろえることを目的とした簡便な機構および操作手順を考案する。本稿では以後、このためのハンドをCH (Corners holding) handと称する。これは前章で左手とした側のハンドである。外観を図3に示す。CH handは三本の指を持ち二回の把持を行うことができる。三本の指のうち、固定された指を指1、指1の外側に配置する可動式の2本の指を、指1側からそれぞれ指2、指3とする。最初の把持では、指1と指2により布生地を挟み込む。その後、指2と指3によって別の角部を把持する。後者の把持実現するためには指1と指2の状態を維持しつつ指3を動作させる必要がある。CH handではこれらの動きを一つのアクチュエータのみで行う。このため、間欠歯車を用いる。間欠歯車は、歯車の一部にのみ歯を設けた歯車であり、回転を断続的に伝えることができる。すなわち、一定の回転から任意の時に回転を停止させるような複雑な伝達を行うことが可能である。

## 5. 実験

2台の提案エンドエフェクタをそれぞれ製作した。ねじやスペーサなどの固定具を除き、ほぼすべての部品を3Dプリンタで造形した。モータにはベストテクノロジー社のDynamixel・AX-18Aを使用した。全体の重量は213.6[g]であった。

PS handの性能評価及び、先行研究の課題を解決できるかを確認するため、先行研究とPS handを用いてつまみ滑り動作実験を行った。実験のためのロボットアームとして、カワダロボティクス社製の双腕ロボットHIROを用いた。ロボットアームの動きは布生地の大さきから事前に決定した。実験の成否判定については、展開終了時に布生地がエンドエフェクタから外れているか、エンドエフェクタが布生地の縁と接触していない場合には失敗とした。

実験対象として図4に示す3種類の布生地を用いた。Cloth 1の厚みは1.35 mmであり、編み込みの緩いガーゼ地で、反対側が透けるほどの薄い布生地である。Cloth 2とCloth 3の厚みはそれぞれ2.41 mm, 2.80 mmであった。長辺と短辺のうち短辺を用いてつまみ滑り展開を行った。

実験結果を表1に示す。先行研究のエンドエフェクタではCloth 1とCloth 2で高い成功率を示したが、Cloth 3では40%であった。一方で、PS handではいずれの条件においても80%の成功率を示した。Cloth 1とCloth 2においては成功率が多少定価したが、Cloth 3においては成功率が維持できた。このことからPS handを用いることで布地の厚みによらずに展開可能であることは確かめられた。

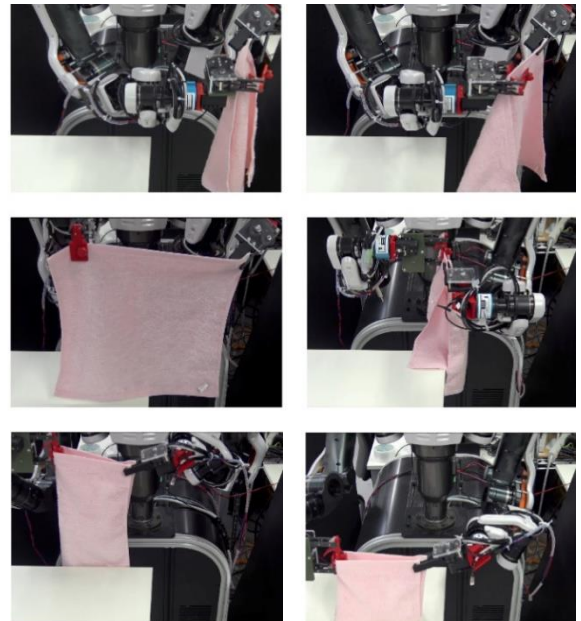


Fig. 5 Unfold-to-fold manipulation

最後に、PS handとCH handを用いて展開と折り畳みを一貫しておこなった。作業は、布生地の角部の一つをCH handに把持させてぶら下げた状態から始め、つまみ滑り動作、折り畳み動作を続けて実行した。この流れでは、PS handが新たに開いた側の角部をCH handに渡し、すでに把持している角部と位置を合わせて把持させることが必要である。そこで、つまみ滑り展開は角部の少し手前までとし、PS handから布生地が数十mm程度はみ出すようにする。そして、PS handを動かして突き出した角部をCH handの指2、指3の間に持っていき、その後指3を閉じることで2カ所同時把持を実現した。その後、両手を遠ざけるようにロボットアームを動かすことで、布生地が二つ折りになった状態とする。さらには、机を利用することで布生地を4つ折りにすることができた。図5に実験の様子を示す。

## 6. 結言

本章では布生地の折り畳み動作を行うため、2種類のエンドエフェクタの提案を行った。そして、実際に製作したエンドエフェクタを用いて複数の矩形布生地を実験を行い、折り畳みが可能であることを確認した。

今後は、PS handでの展開成功率を向上すべく、硬度の高い部品への差し替えをおこなう。また、動作の高速化を試みる。

謝辞 This work was partially supported by KAKENHI and JST [Moonshot R&D][Grant Number JPMJMS2034].

## 参考文献

- [1] M. Shibata, T. Ota, and S. Hirai, "Robotic Unfolding of Hemmed Fabric using Pinching Slip Motion," ICAM, 2010.
- [2] H. Yuba, S. Arnold, K. Yamazaki, "Unfolding of a rectangular cloth from unarranged starting shapes by a Dual-Armed robot with a mechanism for managing recognition error and uncertainty," Advanced Robotics, 2017.
- [3] J. Maitin-Shepard, et al. "Cloth grasp point detection based on multiple-view geometric cues with application to robotic towel folding," in Proc. of ICRA, 2010.
- [4] A. Doumanoglou, et al. "Folding clothes autonomously: A complete pipeline," IEEE Transactions on Robotics, 2016.
- [5] S. Fujihara, K. Yamazaki, T. Watanabe, "An End-Effector for Pinch and Slide Unfolding Using a Protruding Passive Rotation Mechanism," in Proc. of ICMA, 2022.